

α 污染层对 ZTC4 钛合金铸态试样冲击性能的影响

Effects of the Contamination of α Layer on the Impact Properties of ZTC4 Titanium Casting Samples

赵嘉琪¹, 吴国清², 程祥军², 南海¹

(1 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

ZHAO Jia-qi¹, WU Guo-qing², CHENG Xiang-jun², NAN Hai¹

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2 School of Materials Science and Engineering, Beihang

University, Beijing 100191, China)

摘要: 在表征 ZTC4 钛合金铸件污染层的基础上, 分析了 α 污染层对 ZTC4 钛合金铸态试样冲击性能的影响情况。实验结果表明, α 污染层主要是由钛液与铸型材料界面反应产生的, 为粗大的 α 片层组织。 α 污染层的存在对 ZTC4 钛合金铸态试样冲击性能影响显著, 当铸态试样含 α 污染层一侧受冲击时, 冲击强度下降了近 9%; 而当铸态试样含 α 污染层一侧的背面受冲击时, 冲击强度下降了近 80%, α 污染层严重恶化了 ZTC4 钛合金铸态试样的冲击性能。

关键词: 钛合金铸件; 污染层; 微观组织; 力学性能

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.06.012

中图分类号: TG166.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)06-0059-04

Abstract: The surface contamination layers of ZTC4 titanium castings were characterized and the effects of α layer existence on impact properties of ZTC4 titanium castings were investigated. The results show that the microstructure of α layer is coarse lamellar, which is generated due to the interface reaction between titanium liquid and mold materials. The α layer has great influence on the impact properties of ZTC4 titanium castings. By comparison with that of the casting sample without α layer, as the side with α layer in castings sample is impacted, the decrease of impact strength of the casting sample is about 9%, while the opposite side in castings sample is impacted, the decrease of impact strength of the casting sample is about 80%. That is, α layer does harm to impact properties of ZTC4 casting sample seriously.

Key words: casting titanium alloy; surface contamination layer; microstructure; property

自从 20 世纪 80 年代中期以来, 大型、薄壁、复杂、整体、精密铸件制造已经成为国外航空、航天飞行器用的钛合金精铸结构件制造技术的发展趋势, 这类铸件整体结构性好, 可靠性高, 重量轻, 加工成本低, 在航空航天领域内具有广阔的应用前景^[1-4]。随着适航认证体系的逐步建立和完善, 对于飞机零部件, 尤其是对关键部件性能提出了更高的要求, 进而对铸件质量提出了更高的要求^[5]。影响铸造钛合金性能的因素很多, 铸件的内部组织大小, 成分均匀性, 内部缩松、缩孔、气孔等缺陷以及表层缺陷均将对其性能产生重要的影响, 其中铸件缺陷的精确控制和消除是提高其质量的重要手段。目前, 对于铸造钛合金工艺与组织、性能间

的关系已有报道^[6,7], 而表层缺陷作为影响钛合金铸件性能的重要因素之一, 如何对其进行有效评估以改善铸件质量、满足适航认证审查的要求, 成为亟待解决的关键问题之一。在钛合金精密铸造过程中, 由于钛熔体具有极高的化学反应活性, 几乎与所有的耐火材料都发生界面反应, 致使在铸件表面形成富氧的 α 污染层^[8], 严重时会引起铸件表面粗糙化、脆化甚至表面裂纹, 恶化了铸件的表面质量, 降低了力学性能, 使成品率大为降低^[9-12]。也有研究工作者证实热暴露后钛材表面污染层的存在导致其拉伸试样断裂源起始于试样表面, 还影响到材料的疲劳性能、断裂韧性和冲击性能。目前对于铸件表面污染层的研究, 多为如何控

制界面反应和反应层的分析上^[13,14],对于反应层的存在对铸件性能的影响效果还缺乏细致研究。

本研究对 ZTC4 钛合金铸件典型污染层的组织形貌进行表征,对冲击性能进行测试,探讨了钛合金铸件 α 污染层存在、受力状态对铸件冲击性能的影响。

1 实验材料和方法

为了获得较厚的、均匀的 α 层组织,本研究设计了“方管”型铸件,如图 1 所示。方管铸件外形尺寸为 80mm×80mm×120mm,壁厚 40mm。该铸件采用熔模精密铸造方法成形,选用 Y₂O₃ 面层材料和 ZrO₂ 背层材料制备型壳。铸件的化学成分均达到 GB/T15073—1994《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》^[15] 的要求,成分见表 1。

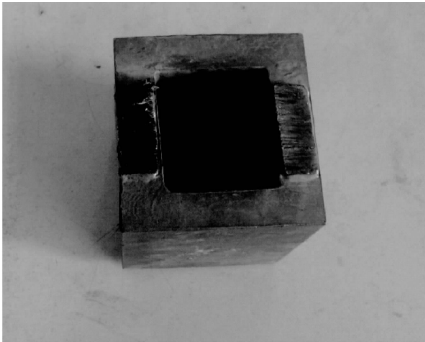


图 1 方管铸件
Fig. 1 Casting of square tube

表 1 ZTC4 铸造钛合金元素含量(质量分数/%)

Table 1 Element content of ZTC4 cast titanium alloy
(mass fraction/%)

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.40	3.98	0.06	0.02	0.014	0.006	0.002	0.17	Bal

采用 BX51M 光学金相显微镜对的微观组织进行观察。金相试样经抛光后,先用 96mLH₂O + 3mLHNO₃ + 1mLHF 的 Kroll 腐蚀液进行腐蚀,腐蚀时间 20s,进行微观组织观察;然后用质量分数为 1% NH₄F 水溶液进行腐蚀,腐蚀时间为 15~30s,进行进一步观察。

冲击试验在 JBS-750 金属摆锤式冲击试验机上进行,摆锤能量为 750J。采用 55mm×10mm×3mm 的无缺口型板状冲击试样,每个条件测试 5 个试样取平均值。

根据微观组织分析结果,在方管铸件不同位置进行取样,加工成两种试样。一种是 ZTC4 钛合金铸态试样的单侧含 α 污染层,另一种不含 α 污染层,分别进行冲击试验,其中对单侧含 α 污染层的试样分别从含 α 污染层一侧和其背面进行冲击试验。

2 实验结果与讨论

2.1 α 污染层的形成

图 2 所示为 ZTC4 方管铸件内壁和外壁最边缘位置的微观组织。如图2(a)所示,方管铸件内壁微观组

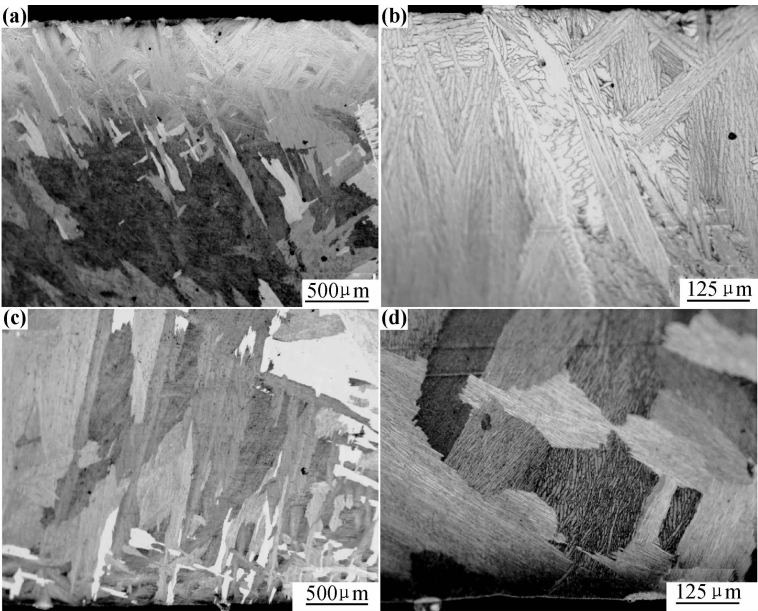


图 2 ZTC4 钛合金方管铸件内壁和外壁微观组织 (a),(b)内壁微观组织;(c),(d)外壁微观组织

Fig. 2 Microstructure of the inner and outer wall in the square tube casting of ZTC4 alloy

(a),(b)microstructure of inner wall;(c),(d)microstructure of outer wall

织中可以观察到,从外边缘向内存存在一条与基体组织明显区别的白色亮带区,经测量,该亮带区的厚度约 600μm。图 2(b)所示为该区域放大后的微观组织形貌,从图 2(b)可以发现,该区域为粗大的 α 片层组织,其中 α 片层状组织沿着铸件的垂直方向由外向里生长。而图 2(c),(d)所示方管铸件外壁微观组织均匀一致,无明显白色亮带,由此判断方管铸件外壁未形成明显的 α 污染层。

从上述结果可知,并非在铸件所有的表面都能形成 α 污染层。α 污染层的形成与凝固过程中的冷却速率和元素扩散有关。在本研究使用的方管铸件中,在凝固过程中,铸件外壁热量传输较快,冷却也较快,且凝固收缩应力导致外壁与型壳材料快速脱离,而铸件内壁与型芯接触,热量传输慢,冷却慢,为 α 污染层的形成提供充足的温度和时间。另外,凝固过程中的收缩应力导致内壁与型芯接触紧密,促进了元素的扩散过程,也为 α 污染层的形成提供有利条件。

2.2 α 污染层对 ZTC4 钛合金铸件冲击性能的影响

图 3 所示为不含 α 污染层和单侧含 α 污染层的铸造 ZTC4 钛合金试样在不同位置冲击时的冲击性能测试结果,图 4 为其中典型的冲击曲线。从图 3 可知,不含 α 污染层的试样,其平均冲击功约为 33J;单侧含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧受冲击时,平均冲击功约为 30J,与不含 α 污染层的试样相比下降了 9%;而单侧含 α 污染层试样在含 α 污染层一侧背面受冲击时,平均冲击功约为 7J,与不含 α 污染层的试样相比下降了 80%。

从图 4 所示单个典型冲击曲线和表 2 单个典型冲

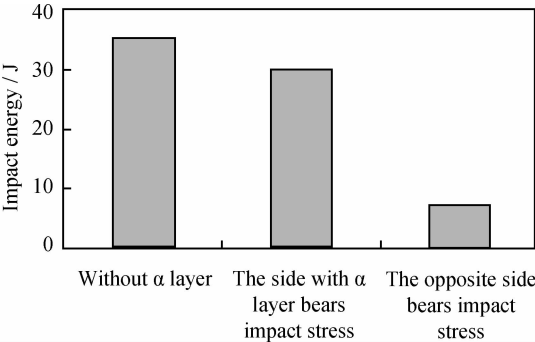


图 3 ZTC4 钛合金铸态试样的冲击性能
Fig. 3 Impact properties of ZTC4 titanium casting samples

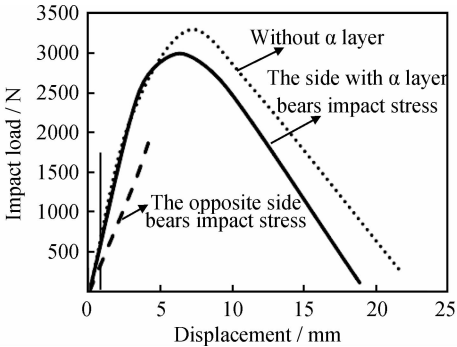


图 4 ZTC4 钛合金铸件试样的单个典型冲击曲线
Fig. 4 Typical impact curves of ZTC4 casting samples

击功数据可知,不含 α 污染层试样的冲击曲线与 α 污染层一侧受冲击的曲线近似,存在明显的裂纹形成和裂纹扩展两阶段。而 α 污染层一侧背面受冲击时,与前两者相比存在明显差异,其冲击曲线上只有裂纹形成阶段,当冲击载荷达到最高值后即发生瞬间断裂,无裂纹扩展阶段。

表 2 图 4 中单个典型试样的冲击试验结果
Table 2 The impact test results of single typical specimen in fig. 4

Serial	Stress state	Crack forming energy/J	Crack extension energy/J	Impact energy/J
One side with α layer in castings sample	The side with α layer bears impact stress	13. 14	16. 82	29. 96
	The opposite side bears impact stress	7. 54	0	7. 54
Castings sample without α layer	—	15. 49	19. 81	35. 30

从表 2 所示的数据可知,不同试样在冲击试验各阶段的做功情况存在明显差别。不含 α 污染层试样,其形成功为 15. 49J,扩展功为 19. 81 J,总冲击功为 35. 30J,最大冲击载荷为 3250N;单侧含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧受冲击时,形成功为 13. 14J,扩展功为 16. 82J,总冲击功为 29. 96J,最大冲击载荷为 3000N;单侧含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧背面受冲击时,形成功为 7. 54J,扩展功为 0,总冲击功为

7. 54J,最大冲击载荷约为 1750N。由此可知,与不含 α 污染层试样相比,含 α 污染层一侧受冲击时,其冲击总功下降 15%,形成功下降 15%,扩展功下降 15%;含 α 污染层背面受冲击时,其总冲击功下降约 80%,形成功下降约 50%,扩展功下降 100%。也就是说,α 污染层的对铸造 ZTC4 铸件的冲击性能有影响,且 α 污染层一侧背面受冲击时对性能的影响更显著。

从本文的研究结果可知,α 污染层的形成对铸件

冲击性能影响较大。这是因为 α 层作为脆性层,抵抗冲击载荷的能力较基体更差,在外力作用下,发生微小变形即发生破坏。当 α 层一侧背面受冲击时, α 层承受冲击载荷带来的拉应力,发生微小的弹性变形后即形成裂纹,裂纹来不及扩展即发生瞬间断裂。 α 层一侧受冲击时, α 层一侧承受冲击载荷带来的压应力, α 层一侧背面(基体)承受冲击载荷带来的拉应力,裂纹在承受拉应力的一侧形成并扩展,当裂纹扩展到 α 层区域时,迅速断裂。也就是说 α 污染层实际上相当于减少了试样的厚度,缩短了裂纹扩展的行程,因此,其冲击曲线与不含 α 层的试样冲击曲线形状相似,只是冲击功有所降低。

从铸件实际工况看,铸件往往有单面加工、双面加工、双面均不加工的情况,受力时往往存在一面受压力的情况。结合上述研究结果,为了保证铸件质量,铸件表面 α 污染层最好能进行处理,尤其是使用中在 α 污染层背面受力时,由于隐患较大,必须对 α 污染层进行处理。工程上,可通过机械法、化学法或机械与化学相结合的方法,对钛合金表面形成的 α 污染层进行有效清理,必要时应建立严格的检测制度,保证清理效果。

3 结论

(1)ZTC4 钛合金方管铸件内壁在凝固过程中与型芯紧密接触,热量传输慢,冷却慢,促进元素的扩散,形成了厚大的 α 污染层,铸件内壁 α 层厚度约 $600\mu\text{m}$ 。

(2) α 污染层对 ZTC4 钛合金铸件的冲击性能有显著影响。不含 α 污染层的试样的冲击功平均约为 33J;对于单侧含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧受冲击时,其冲击功平均约为 30J,下降约 9%;而对于含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧背面受冲击时,其冲击功平均约为 7J,下降高达 80%。

(3)单侧含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧受冲击和不含 α 污染层的试样冲击曲线形状相似,均存在裂纹形成和裂纹扩展阶段;而单侧含 α 污染层试样中的 α 污染层一侧背面受冲击时,达到最高值后即瞬间断裂,冲击曲线上只有裂纹形成阶段,没有裂纹扩展阶段。

参考文献

- [1] 肖树龙,陈玉勇,朱洪艳,等.大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J].稀有金属材料与工程,2006,35(5):678—681.
- XIAO Shu-long, CHEN Yu-yong, ZHU Hong-yan, et al. Recent advances on precision casting of large thin wall complex castings of titanium alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(5):678—681.
- [2] 南海,谢成木,魏华胜,等.大型复杂薄壁类钛合金铸件的研制

- [J]. 中国铸造装备与技术,2001,(2):12—14.
- NAN Hai, XIE Cheng-mu, WEI Hua-sheng, et al. The study of large thin-wall complex integrated titanium precision casting [J]. China Foundry Machinery and Technology, 2001,(2):12—14.
- [3] KLEPEISZ J, VEECK S. The production of large structural titanium castings[J]. JOM, 1997, 49(11):18—20.
- [4] EYLLON D, BARICE W J, BOYER R R, et al. Casting of high strength beta titanium alloys[A]. Sixth World Conference on Titanium, Société Française de Métallurgie[C]. Warrendale, PA: TMS, 1989. 655—660.
- [5] CCAR-23-R3. 正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定[S].
- [6] 赵嘉琪,杨伟光,南海,等.热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金性能的影响规律[J].材料工程,2011,(10):42—45.
- ZHAO Jia-qi, YANG Wei-guang, NAN Hai, et al. Effects of hot isostatic pressing treatment parameters on mechanical properties of ZTC4 casting titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2011,(10):42—45.
- [7] 杨伟光,赵嘉琪,南海,等.热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金组织的影响规律[J].材料工程,2011,(9):25—28.
- YANG Wei-guang, ZHAO Jia-qi, NAN Hai, et al. Effects of HIP treatment parameters on microstructure of ZTC4 casting titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2011,(9):25—28.
- [8] 李晓飞,吕志刚,崔旭龙.钛合金精密铸件表面污染层生成机理及检测方法[A].中国铸造协会精铸分会第十一届年会论文集[C].石家庄:中国铸造协会精铸分会,2009.206—212.
- [9] 高玉魁.航空零件的表面强化制造技术和表面完整性检测体系[A].中国科协第五届青年学术年会文集[C].北京:中国科技出版社,2004.654—657.
- [10] 汤精明,姜忠宇.表面完整性对 40Cr 钢耐腐蚀性的影响[J].热加工工艺,2010,39(2):100—101.
- TANG Jing-ming, JIANG Zhong-yu. Influence of surface integrity on corrosion resistance of 40Cr steel [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(2):100—101.
- [11] 胡桂珍,邹彦如.钛及钛合金的铸造[J].稀有金属材料与工程,1995,24(3):26—30.
- HU Gui-zhen, WU Yan-ru. Titanium and casting technology of titanium alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1995, 24(3):26—30.
- [12] 舒群,郭永良,陈子勇,等.铸造钛合金及其熔炼技术的发展现状[J].材料科学与工艺,2004,12(3):332—336.
- SHU Qun, GUO Yong-liang, CHEN Zi-yong, et al. Development of casting and melting technology of titanium alloys [J]. Material Science and Technology, 2004, 12(3):332—336.
- [13] YU G L, LI N, LI Y S, et al. The effects of different types of investments on the alpha-case layer of titanium castings[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2007, 97(3):57—164.
- [14] ZHAO E T, KONG F T, CHEN Y Y, et al. Interfacial reactions between Ti-1100 alloy and ceramic mould during investment casting[J]. Trans Nonferrous Met Soc of China, 2011, 21(S2):348—352.

收稿日期:2012-08-10;修订日期:2013-03-25

作者简介:赵嘉琪(1980—),男,工程师,硕士,从事钛合金铸造方面的研究,联系地址:北京市 81 信箱 21 分箱铸钛技术中心(100095),E-mail:zhaojiaqi@sina.com